

Décembre 2015
volume n° 5 / numéro n° 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Innovations agricoles : quelle place pour l'agronomie et les agronomes ?

ASSOCIATION FRANÇAISE
D'AGRONOMIE

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad

Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad

Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Valentin BEAUVAL, agriculteur
- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axérial
- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne
- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

Avant-propos

P7- O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

Éditorial

P9- L. PROST, B. TRIOMPHE et P.Y. LE GAL (coordonnateurs du numéro)

Des récits d'innovation en agriculture

P13- De nouveaux horizons et une meilleure valorisation des plantes et des déjections animales grâce à la méthanisation : l'expérience de l'EARL Fritsch en Alsace.

Ch. BARBOT, Ch. GINTZ, JF. FRITSCH

P17- Quand innovations technique et organisationnelle se complètent : les Coopératives d'utilisation de matériel agricole (Cuma) au Bénin

M. BALSE, M. HAVARD, P. GIRARD, C. FERRIER, T. GUÉRIN

P25-Témoignage d'une CUMA engagée dans le développement durable

Y. FRANCOIS

P27- Fraise française : diffusion de la culture sur substrat

M. MIQUEL, B. PLANTEVIN

Quel est le rôle des agronomes et quelle place de l'agronomie dans le processus d'innovation ?

P33- Le collectif en faveur de la transition des agriculteurs vers des systèmes plus économes et plus autonomes

Témoignage de Fred et Véronique Kaak, éleveurs en Limousin

L. BLONDEL

P39- Accompagner l'innovation en agriculture de conservation : quels apports des agronomes du système de culture ?

C. NAUDIN, P.Y. LE GAL, L. RANAIVOSON, E. SCOPEL

P47- Les agriculteurs sources d'innovations : exemple des associations pluri-spécifiques dans le grand Ouest de la France

A. LAMÉ, M.H. JEUFFROY, E. PELZER, J.M. MEYNARD

P55- L'articulation recherche-développement et son organisation territoriale, défi pour l'agronomie : l'expérience Agro-Transfert

J. BOIFFIN, M. CHOPPLET

P65- La fertilisation des cacaoyères en Côte d'Ivoire. 35 ans d'innovations villageoises et les rendez-vous ratés des agronomes et de l'Industrie du chocolat

F. RUF

Quelles conséquences sur les concepts et les modes d'intervention des agronomes et sur l'agronomie ?

P77- L'innovation locale au Bénin – trajectoires de développement en agriculture sur les trente dernières années

A. FLOQUET, R. MONGBO, B. TRIOMPHE

P87- Lorsque les agriculteurs familiaux innoveront : Cas de la plaine du Saïs (Maroc)

P. DUGUÉ, F. AMEUR, M. BENOUNICHE, M. EL AMRANI, M. KUPER

P97- L'innovation dans les pratiques professionnelles des agronomes face aux externalités négatives du modèle dominant en grandes cultures

S. GROSSO

P105- Nanomatériaux et nanotechnologies en agriculture : questions pour l'agronomie

D. LANQUETUIT, M. DETCHEVERRY

Colloques, notes de lecture

P117- La diversification des cultures : Lever les obstacles agronomiques et économiques – Ed.Quae

M. BENOIT

P121-Le rapport « Agriculture innovation 2025 »

P. CLOUVEL

P123 - Compte rendu sur le colloque :

Partage des données pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement : des opportunités pour innover et créer de la

P. PRÉVOST et O. HOLOGNE

Annexe

P127 Appel à contribution du numéro



Accompagner l'innovation en agriculture de conservation : quels apports des agronomes du système de culture ?

Krishna NAUDIN¹ - Pierre-Yves LE GAL²
Lalaina RANAIVOSON³ - Éric SCOPEL¹

¹ Cirad - Unité de recherche AïDA - TA B-115/02 - 34398 Montpellier (France) - E-mail : krishna.naudin@cirad.fr
eric.scopel@cirad.fr

² Cirad - UMR Innovation - Bâtiment 15 - Bureau 226 - TA C-85/15-73, rue Jean-François Breton - 34 398 - Montpellier Cedex 5 (France)

³ FOFIFA - Ampandrianomby - Route d'Andraisoro - Boîte Postale 1690 - 101 Antananarivo (Madagascar)

Résumé

Dans les pays du sud en général, et en Afrique subsaharienne en particulier, l'adoption de systèmes de culture innovants en agriculture de conservation (AC) est souvent limitée par la concurrence pour les résidus de culture avec l'élevage. De plus, les bénéfices attendus de l'AC peuvent varier fortement en fonction de la quantité de résidus conservée. Par exemple, la réduction du ruissellement et de l'érosion peut être effective avec moins de 3 t/ha de mulch alors qu'il faudra plus du double pour avoir un effet significatif sur les adventices. D'autre part, la question des usages multiples des résidus doit être traitée à l'échelle de l'exploitation et du territoire. Certaines études à ces échelles font ressortir les contraintes à la pratique des AC, d'autres mettent en avant les complémentarités possibles et notamment les gains mutuels entre agriculture et l'élevage. Pour accompagner la prise de décision des acteurs, paysans ou structures d'appui, nous concluons en proposant un cadre d'analyse commun des fonctions agroécologiques de l'AC.

Mots-clés

Afrique subsaharienne, Agriculture de conservation, systèmes de culture innovants, cadre d'analyse pour l'agroécologie.

Abstract

In developing countries in general, and in sub-Saharan Africa in particular, the adoption of innovative cropping systems such as conservation agriculture (CA) is often limited by competition with livestock for crop residues. In addition, the expected benefits from CA can vary greatly depending on the amount of remaining residues. For example, reducing runoff and erosion can be effective with less than 3 t / ha of mulch, but more than the double is required to have a significant effect on weeds. Moreover, the diversified usages of residues should be addressed at farm and territory scales. Studies at these scales highlight the constraints faced by AC implementation, others highlight the complementarities and mutual gains expected especially between agriculture and animal husbandry. We propose a common frame-

work for analysing CA agroecological functions while supporting decision-making processes of actors, farmers and advice structures.

Keywords

Sub-saharan Africa, Conservation agriculture, Innovative cropping systems, agroecological framework.

Introduction

L'agriculture de conservation (AC) est définie par la FAO comme la combinaison du travail minimal du sol, d'une couverture permanente du sol par un mulch végétal vivant ou mort et la diversification des espèces cultivées, en association et/ou dans la rotation avec une plante de service (FAO, 2016). Dans les pays du sud en général, et en Afrique subsaharienne en particulier, la disponibilité en biomasse végétale pour couvrir le sol apparaît comme la contrainte majeure. Cela tient, d'une part, à la faible productivité, en grain et biomasse végétative de la plupart de ces systèmes sous des conditions naturelles très contraignantes, et d'autre part, à l'utilisation de cette biomasse aérienne par les producteurs pour l'alimentation des animaux. Cette situation est souvent responsable de malentendus entre deux types d'acteurs qui ne partagent pas toujours le même point de vue : les structures d'appui au développement agricole (chercheurs, ONG, projets de développement, administration) qui voient dans l'AC un système innovant permettant de gérer la fertilité des sols avec des effets attendus à moyen terme, les producteurs qui voient dans le surplus de biomasse végétative produite une nouvelle ressource fourragère utilisable à court terme. Pourtant, peu d'études renseignent le poids du double usage des résidus en Afrique sur l'adoption de l'AC. Traiter cette question et la confrontation de points de vue qui lui est liée, revient à s'intéresser aux compromis à trouver dans l'utilisation de la biomasse aérienne produite par les résidus de culture et les plantes de couverture, entre gestion de la fertilité du sol et alimentation des troupeaux. Après avoir présenté les bénéfices attendus de la conservation des résidus à la surface du sol, nous montrons comment des études récentes ont traité cette question des compromis aux échelles de l'exploitation et du territoire. Sur cette base, nous proposons que les travaux de conception et d'évaluation quantitative des impacts des systèmes de culture en AC prennent plus systématiquement en compte les différentes fonctions qu'ils fournissent, et surtout qu'ils quantifient plus précisément leurs impacts en fonction des modalités de leur mise en œuvre par les paysans.

L'agriculture de conservation vue par les agronomes : un ensemble de fonctions agroécologiques liées à la biomasse restituée au sol.

Les impacts de l'AC peuvent varier en fonction du niveau d'application des 3 principes de l'AC (Fig. 1), en relation étroite avec le niveau de restitution de la biomasse au sol. Le niveau de performance d'une fonction varie ainsi avec la quantité croissante de mulch laissée au sol.

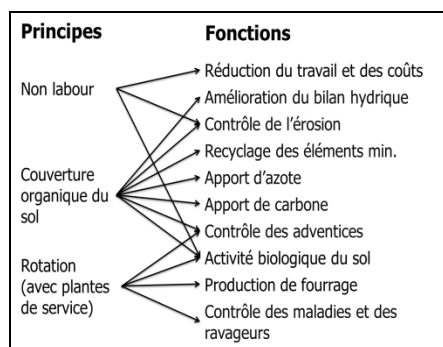


Figure 1 : liens entre les trois principes définissant l'AC et les fonctions d'intérêt pour l'agriculteur et l'environnement

Bilan hydrique

L'amélioration du bilan hydrique des cultures est souvent le premier bénéfice mis en avant dans l'utilisation de l'AC. De nombreuses études rapportent un effet, en général positif, de l'AC et des paillis de résidus sur le bilan hydrique (Scopel *et al.*, 2005; Rockström *et al.*, 2009; Ngwira *et al.*, 2012). Mais aucun article ne rapporte directement des variations de bilan hydrique, par exemple en termes de satisfaction des besoins des cultures en fonction de différentes quantités de mulch. Quelques études montrent les effets de ces quantités croissantes sur l'infiltration, le ruissellement ou l'évaporation, effets qui suivent une relation exponentielle décroissante dans ces deux derniers cas (Lal, 1998 ; Scopel *et al.*, 1999, 2004). Le ruissellement serait alors réduit de 50 %, en comparaison d'un sol nu, avec 3 à 5 t/ha de résidus à la surface du sol. Cette quantité variant en fonction du type de sol (porosité, texture, états de surface), de la pente, du type de résidus (pouvoir couvrant), du régime des pluies (volume, intensité).

Une faible quantité de mulch, e.g 1.5 t/ha (Scopel *et al.*, 2005) ou 3.5 t/ha (Naudin *et al.*, 2010), peut générer un effet positif sur la ressource en eau, et par extension sur le rendement lorsque l'eau est une contrainte majeure dans le milieu étudié. Le mulch peut, dans certains cas, intercepter les pluies et ne pas apporter d'avantage par rapport aux parcelles non couvertes, surtout si le sol est naturellement peu sensible à la compaction ou à l'encroûtement (Baudron *et al.*, 2012). En revanche, la présence de mulch n'apporte pas forcément une augmentation du rendement comparé au labour. L'AC peut même avoir des effets négatifs pour les cultures sensibles aux excès d'eau en cas de pluviosité importante (Sissoko *et al.*, 2013).

Érosion

Le contrôle de l'érosion, hydrique principalement, a été le moteur de l'adoption des techniques d'AC en Amérique du Nord (Uri, 1998) et du Sud (Bolliger *et al.*, 2006). Le rôle des résidus à la surface du sol pour augmenter la tortuosité des écoulements et limiter l'arrachage est bien connu et modélisé (Findeling *et al.*, 2003 ; Smets *et al.*, 2008). Comme pour le ruissellement, la relation entre quantité de mulch et érosion est une exponentielle décroissante et même de petites quantités de résidus peuvent réduire l'érosion hydrique. Cinq tonnes/ha de résidus suffisent alors pour réduire l'érosion d'au moins 50% voire de 80 %, (Smith *et al.*, 1992 ; Lal, 1997 ; Woyessa and Bennie, 2004 ; Scopel *et al.*, 2005 ; Jordán *et al.*, 2010). Il est en général possible, même en

Afrique subsaharienne, d'obtenir suffisamment de résidus pour avoir un effet sur l'érosion, par exemple en laissant sur la parcelle les résidus de céréales (Naudin *et al.*, 2010).

Recyclage des éléments minéraux

Les plantes de service utilisées en AC, en association ou en succession des cultures, peuvent servir de « pompe biologique », en mobilisant les éléments minéraux dans des horizons ou à des périodes où les cultures ne peuvent le faire, puis de remettre à disposition des cultures ces éléments quand leur propre biomasse se dégrade. Cette fonction est particulièrement intéressante quand le régime pluviométrique est responsable d'une forte lixiviation pendant ou après la période de culture. La quantité d'éléments (N, P, K, Ca, S, Mg) mis à disposition des cultures suivantes peut, ou pas, être directement proportionnelle à la quantité de résidus restitués au sol (Blanco-Canqui and Lal, 2009 ; Iqbal *et al.*, 2011).

Apport d'azote

L'azote a un statut particulier du fait de son caractère souvent limitant pour la productivité des cultures dans les pays du Sud. Mais son bilan peut être équilibré, voire positif, grâce à la fixation biologique de l'azote par les *Fabaceae* (Giller, 2001). La quantité d'azote qui retournera au sol dépend de la quantité de biomasse restituée, mais aussi de sa teneur, variable, en azote. Ainsi, pour un même système de culture la quantité d'azote fournie par la plante de couverture peut varier de moins de 50 à plus de 400 kg/ha (Naudin *et al.*, 2012).

De plus seule une partie de l'azote contenu dans les résidus laissés à la surface du sol va pouvoir être effectivement utilisée par la culture suivante après minéralisation, en raison des pertes associées à la volatilisation et à la lixiviation (Maltas *et al.*, 2009).

A cela s'ajoute le phénomène de faim d'azote couramment rencontré en AC, dû à la mobilisation de l'azote par les microorganismes qui dégradent le mulch. Ce phénomène est d'autant plus fort que les résidus de départ possèdent un rapport C/N élevé, que le sol est pauvre en N et que la fertilisation en azote est faible. Ces conditions se retrouvent assez fréquemment en Afrique subsaharienne conduisant à une alimentation des cultures en azote potentiellement déficitaire. Dans ce cas, il importe de prêter attention à la qualité du mulch (type de résidus) autant qu'à la quantité. Au final, il n'apparaît pas de relation univoque entre la quantité de mulch sur le sol et la quantité d'azote mobilisable par la culture (Sainju *et al.*, 2006 ; Maltas *et al.*, 2009).

Ces résultats illustrent la complexité de la dynamique de l'azote dans le sol, liée à de nombreux facteurs également modifiés par l'AC tels que le microclimat du sol, la dynamique de l'eau, la vitesse de croissance des plantes et la microbiologie du sol.

Apport de carbone

L'AC est en général reconnue comme pouvant permettre un maintien, voire un accroissement de la teneur en matière organique (MO) du sol (Tivet *et al.*, 2013 ; Lal, 2015). Le rôle de la suppression du labour dans la diminution du taux de minéralisation et le poids relatif de ce phénomène dans l'accroissement de la teneur en MO font encore débat. En revanche, le rôle de l'augmentation des apports en carbone grâce à la restitution importante des résidus, amélioré par l'adjonction de plantes de services est connu (Corbeels *et al.*, 2006 ; Liu *et al.*, 2014). La quantité de carbone retournant au sol est linéairement et inversement corrélée à celle qui est exportée de la parcelle. Le compromis entre l'exportation de la biomasse aérienne pour les animaux, et la restitution au sol comme amendement organique pose une question évidente pour les producteurs et les agronomes.

Toutefois, deux inconnues viennent compliquer le calcul des bilans, à savoir la part de carbone apportée par les racines et la quantité minimum de carbone qui doit être apportée chaque année pour maintenir la teneur en C du sol. La part racinaire est importante à plusieurs titres : (i) elle peut représenter entre un tiers et la moitié du carbone total des plantes (Buyanovsky and Wagner, 1986 ; Bolinder *et al.*, 1997); (ii) le carbone apporté par les racines a un coefficient d'humification plus élevé (Kätterer *et al.*, 2011); et (iii) le carbone déposé en profondeur dans le sol est protégé par de moindres teneurs en oxygène nécessaire à la minéralisation et également vis-à-vis du labour (Tivet *et al.*, 2013).

De manière assez intuitive on peut comprendre que, plus vite on voudra augmenter la teneur en matière organique d'un sol, plus il faudra apporter de résidus de culture et de plante de service au sol. La quantité minimum à laisser pour maintenir la teneur initiale dépend principalement de cette teneur initiale en carbone (Probert, 2007), de la nature des résidus (Tivet *et al.*, 2013a), de la nature du sol (Razafimbelo *et al.*, 2008 ; Meki *et al.*, 2011), de l'activité biologique (Coq *et al.*, 2007) et du climat qui influe sur la minéralisation (Iqbal *et al.*, 2015). Cette quantité de résidus minimum à laisser au sol a été estimée par exemple à environ 7 t/ha au sud du Brésil (Ferreira *et al.*, 2012). Ce type de calcul a été réalisé notamment dans la perspective d'utiliser les résidus de culture pour produire des biocarburants (Blanco-Canqui, 2013). En revanche, ce calcul a rarement été fait pour l'Afrique sub-saharienne de par le manque de données permettant de calibrer correctement les modèles de dynamique de C du sol.

Contrôle des adventices

Le contrôle des adventices en AC est une fonction à la fois controversée et mal renseignée. Les partisans de l'AC avancent que le mulch permet de limiter l'apparition et la croissance des adventices par son action physique (Altieri *et al.*, 2011). Ils considèrent également que l'absence de labour limite la multiplication végétative des espèces pérennes et évite de laisser en profondeur les semences d'adventices déjà présentes (Ramesh, 2015). Enfin, la présence de plantes de service en association ou succession avec les cultures doit entrer en concurrence avec les adventices, et donc

réduire la production de graines, et la réalimentation du stock (Ramesh, 2015).

Toutefois, peu d'études ont caractérisé précisément cet effet de l'AC sur les adventices. Certains articles constatent une réduction de la biomasse d'adventices à partir de 1 à 2 t/ha de mulch (Bunna *et al.*, 2011). D'autres rapportent au contraire que le mulch n'a aucun effet en dessous de 5 à 6 t/ha (Campiglia *et al.*, 2010 ; Mischler *et al.*, 2010). Certains auteurs ont même mis en évidence que la présence d'un mulch en faible quantité (autour de 3 t/ha) pouvait favoriser l'émergence des adventices en améliorant la teneur en eau du sol les années sèches. Les quantités de mulch pratiquement mobilisables en conditions paysannes limitent en effet le contrôle physique des adventices par le mulch. De plus, l'encombrement dû au mulch complique le sarclage des adventices en agriculture manuelle. En cas de faible niveau de couverture (<4 t/ha) et sans utilisation d'herbicides, les adventices peuvent s'avérer plus problématiques à gérer par les paysans que dans des parcelles sur sol nu (*obs. pers.* sur les parcelles paysannes présentées dans Naudin *et al.* (2010) et Bruelle *et al.* (2014).

Activité biologique

Que ce soit en Amérique du Sud ou en Europe, le symbole des agriculteurs sans labour est bien souvent le ver de terre^{1,2}. Sur tous les continents des études démontrent que le nombre d'invertébrés dans le sol est supérieur en AC comparé à l'agriculture conventionnelle (Brown *et al.*, 2003 ; Blanchart *et al.*, 2007 ; Brevault *et al.*, 2007). Cet effet apparaît de façon significative dès la première année d'AC, laissant à penser que la suppression du travail du sol joue un rôle important dans l'apparition de cette activité macro- et méso-faunique. L'effet de différentes quantités de mulch restituées au sol sur la macrofaune a rarement été étudié (Blanco-Canqui and Lal, 2009). Cependant, l'accroissement du nombre d'individus ou de la diversité de la macrofaune du sol peut avoir comme corollaire l'accroissement du nombre ou de la diversité des ravageurs des cultures comme les iules ou les « vers blancs » par exemples (Brevault *et al.*, 2008 ; Ratnadass *et al.*, 2013). De fait, la spécificité et la complexité des mécanismes biologiques en jeu rendent difficile l'évaluation des effets de la restitution de quantités plus ou moins importantes de résidus sur l'activité biologique du sol, notamment sur les ravageurs telluriques. Au-delà de la quantité, la composition des résidus a une forte influence sur la composition faunistique du sol (Blanchart *et al.*, 2006).

Quelles quantités de mulch pour quelles fonctions ?

Ces différents travaux montrent que la quantité de mulch à garder sur le sol pour bénéficier au mieux des fonctions recherchées varie selon ces fonctions. Certaines demandent relativement peu de mulch (limitation du ruissellement), d'autres nettement plus (contrôle des adventices). Quelques fonctions sont négativement affectées par la pré-

¹ <http://www.febrapdp.org.br/>

² <http://agriculture-de-conservation.com>

sence de quantités importantes de mulch : plus de ravageurs avec du mulch (Brevault *et al.*, 2008), plus de faim d'azote avec des résidus de graminées et pas de fertilisation azotée (Thierfelder *et al.*, 2013 ; Baudron *et al.*, 2015a).

Jusqu'ici, les recommandations aux producteurs en termes de quantité de mulch à garder au sol sont rarement explicites sur les fonctions associées que l'on cherche à optimiser. La FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)³, l'USDA (U.S. Department of Agriculture) et ARMS (Agricultural Resource Management Survey)⁴ considèrent qu'une parcelle est cultivée en AC si elle présente plus de 30% de couverture du sol. Mais ce taux peut correspondre à des quantités très différentes de résidus. Par exemple, ces 30 % sont atteints avec 0.48 t/ha pour des résidus frais de *Vicia villosa* (Naudin *et al.*, 2012) ou 4 t/ha pour des tiges de maïs (Scopel *et al.*, 1999). De son côté, l'association française BASE souligne dans sa définition de l'AC que « les premières améliorations apparaissent à partir de 30 % de taux de couverture⁵ ». Enfin la revue « Soil and Tillage Research » a publié une lettre aux éditeurs provenant de quelques grandes figures de l'AC dans le monde (Derpsch *et al.*, 2014). Ceux-ci voient dans la présence d'une couverture du sol en quantité suffisante un facteur clé de la réussite des systèmes en AC. Toutefois, ils ne vont pas jusqu'à proposer une quantité minimum ou un pourcentage de couverture minimum à atteindre.

Ces recommandations gagneraient à être plus explicites en liant pourcentage de couverture, quantité de résidus et fonctions agro-écologiques attendues par la conservation du mulch. Il serait ainsi plus aisé de quantifier les compromis entre les gains obtenus par la conservation des résidus au sol et leur utilisation pour l'alimentation des animaux.

Les compromis sur l'utilisation de la biomasse

La plupart des auteurs s'accordent à dire qu'une des contraintes majeures à l'efficacité de l'AC en Afrique est la compétition avec les animaux d'élevage pour l'utilisation de la biomasse végétale (Giller *et al.*, 2009 ; Corbeels *et al.*, 2014). Toutefois, peu d'études ont cherché à préciser les compromis réalistes à trouver entre l'utilisation de la biomasse pour couvrir le sol et son utilisation pour nourrir les animaux. Ces compromis doivent être réfléchis à deux échelles différentes : celle de l'exploitation agricole et celle du territoire.

À l'échelle de l'exploitation agricole, quelques auteurs ont étudié l'impact ou la complémentarité entre AC et élevage. Andriarimalala *et al.* (2013) ont ainsi quantifié l'intérêt économique de l'utilisation d'une partie de la biomasse aérienne de plantes de couverture dans la ration animale et de la substitution d'engrais minéraux par du fumier. Baudron *et al.* (2013) ont calculé les bénéfices en termes de production végétale et animale permis par l'adoption conjointe d'une augmentation de la production de maïs, d'une restitution supérieure de résidus, de la mécanisation du travail et d'un changement dans l'alimentation des animaux. Ces auteurs concluent que la question n'est pas de savoir « si » mais

« comment » les résidus peuvent bénéficier à la fois au sol et à l'élevage. De plus, ils soulignent que l'impact du mulch sur la productivité peut varier et que la recommandation de garder 30 % de couverture du sol doit être revue et évaluée pour chaque site. Plus récemment, il a été montré par voie de modélisation que l'AC pouvait être compatible et même profitable dans des systèmes de production mixte agriculture-élevage (Naudin *et al.*, 2014 ; Homann-Kee Tui *et al.*, 2014). D'autres auteurs ont mené des études *ex-ante* de l'impact que pourrait avoir l'adoption de l'AC à l'échelle des exploitations africaines à l'aide d'un modèle de simulation (Djamen *et al.*, 2015). Ils concluent que « les situations les plus favorables à l'introduction de l'AC sont rencontrées pour les exploitations déjà autosuffisantes [...] ou celles ayant un important déficit fourrager initial lié à un important cheptel bovin ». Comme pour tous les modèles, les sorties dépendent beaucoup des données d'entrée. Leurs simulations étant faites sur la première année du système de culture, ces auteurs soulignent l'intérêt qu'il y aurait eu à réaliser des simulations pluriannuelles « prenant en compte les effets cumulatifs des rotations combinées à l'augmentation des rendements et donc de résidus de cultures, et de l'amélioration progressive de couverture du sol ».

L'évaluation fiable de l'intégration de l'AC à l'échelle de l'exploitation devrait en effet idéalement combiner des références provenant (i) d'observations pluriannuelles, notamment de temps de travaux, réalisées sur des systèmes de culture réellement pratiqués par des paysans, mais cette situation est assez rare en Afrique (Naudin *et al.*, 2014 ; Bruelle *et al.*, 2014) ; (ii) de résultats expérimentaux obtenus en situations contrôlées mais dont l'extrapolation à des situations réelles d'agriculteurs en termes de performances agronomiques et de temps de travaux pose problème ; et (iii) de modélisation biophysique des cultures. Dans ce dernier cas, les résultats obtenus permettent sans doute de recouper de manière plus fiable la diversité des situations biophysiques mais ce type de modélisation ne renseigne pas sur les temps de travaux des différentes techniques représentées (Baudron *et al.*, 2013). La combinaison de ces trois sources d'information permettrait d'identifier et de comprendre au mieux les facteurs limitants et les marges de manœuvre à la production dans les exploitations agricoles.

Peu d'études sur les compromis AC-élevage ont été menées à l'échelle plus large du territoire. En Afrique subsaharienne, il est courant que les résidus de cultures soient laissés par les agriculteurs à la vaine pâture. Dans ce cas, la conservation des résidus pour servir de mulch aura un impact sur l'alimentation des animaux présents sur le territoire. Ainsi, Baudron *et al.* (2015b) ont simulé l'impact que pourrait avoir l'adoption de l'AC par une partie des habitants d'un territoire villageois et analysé les marges de manœuvre nouvelles et les problèmes potentiels posés par l'adoption de cette nouvelle technologie. Il en ressort que la seule façon pour augmenter à la fois la production des cultures grâce à l'utilisation du mulch tout en augmentant la densité de bétail, est d'augmenter la production de biomasse végétale grâce à l'utilisation de fertilisation azotée. Cette étude conclut également que le niveau optimum de résidus qui doivent être conservés dépend de l'échelle d'étude à laquelle on se place : champ, exploitation ou territoire. Jusqu'ici, la

³ <http://faostat.fao.org/site/694/default.aspx>

⁴ <http://www.ers.usda.gov/media/135329/eib70.pdf>

⁵ <http://asso-base.fr/L-Agriculture-de-Conservation-.html>

littérature scientifique ne rapporte pas d'études en Afrique portant sur l'amélioration de la ressource fourragère disponible à l'échelle du territoire, qui permettrait de diminuer la pression sur la biomasse des parcelles cultivées, combinée à un aménagement de l'espace et à une optimisation des fonctions de production de chacune des portions de territoire identifiées. La façon dont les divers acteurs locaux s'accordent pour améliorer la gestion de cette ressource fourragère à l'échelle du territoire a été traitée dans certains projets de développement en Afrique (Dugué and Olina, 2015), mais sans évaluation chiffrée des impacts de tels accords.

Baudron et al. (2013, 2014) ont réalisé une telle évaluation en tenant compte à la fois des impacts agronomiques de la rétention des résidus de maïs en surface sur la production de céréales, et de l'impact de l'utilisation de ces résidus pour nourrir les animaux sur leur productivité. Leur démarche marque un progrès par rapport aux travaux antérieurs puisqu'elle vise à quantifier quels sont les seuils et les compromis chiffrés. Elle présente l'intérêt de couvrir l'échelle du champ jusqu'à celle de régions entières de l'Afrique et de montrer que d'un point de vue des bilans en biomasse, l'AC et l'élevage peuvent être compatibles. Mais les mécanismes agronomiques pris en compte sont alors très simplifiés. Ainsi, l'effet de la rétention de résidus sur les adventices n'est pas pris en compte, pas plus que les temps de travaux supplémentaires pour le sarclage d'une couverture partielle du sol. Les effets à moyen et long terme de différents niveaux de restitution sur la fertilité du sol, puis sur le rendement, ne sont pas davantage étudiés.

Quelles recherches sur l'AC pour accompagner les acteurs ?

In fine, peu d'études scientifiques traitent de manière synthétique et quantifiée l'impact de l'AC, tant à l'échelle du champ, qu'il soit paysan ou expérimental, qu'aux échelles supérieures. Les agronomes peuvent donc parfois être démunis pour répondre de manière complète aux questions que se posent des groupes de paysans, des techniciens, des politiques ou des bailleurs de fonds, sur les bénéfices réellement atteignables par l'AC dans les conditions locales. Les agronomes pourraient gagner en efficacité et pertinence en développant un cadre d'analyse qui permettrait à la fois de renseigner les différents impacts potentiels de l'adoption de divers systèmes de culture en AC et d'estimer ex-ante le niveau de performance des fonctions agro-écologique fournies par l'AC. Ce cadre commun, sous sa forme la plus simple, serait un cadre conceptuel et sous une forme la plus élaborée des modèles mathématiques couplés, qui permettrait de chiffrer avec plus de détail les impacts potentiels attendus. Il s'agirait ainsi de coupler la modélisation de la dynamique du carbone, érosion, contrôle des adventices avec des modèles de croissance des cultures.

Pour les agronomes, il ne s'agit pas forcément de développer les connaissances fines sur les mécanismes, mais d'être en mesure de fournir des relations, valeurs de seuils et études de cas pour guider les décisions ex-ante des paysans et décideurs et mieux comprendre les résultats ex-post. Un

tel cadre pourrait également faire ressortir les besoins en connaissances supplémentaires sur tel ou tel mécanisme pour s'adapter aux contraintes locales spécifiques. Il ne s'agit pas non plus de faire une évaluation du système de culture de manière isolée des échelles supérieures (exploitation, territoire) mais d'être capable de fournir aux paysans, techniciens et collègues chercheurs des outils et références pour une évaluation multicritère quantifiée de l'impact de ces SC.

Une sortie possible d'un tel cadre d'analyse serait l'évolution du niveau des fonctions agrécologiques rendues par le mulch avec une exportation croissante de la biomasse aérienne du champ, c'est-à-dire avec un mulch de plus en plus réduit. Par exemple, sur la fig. 2, on peut voir une simulation d'une exportation croissante de biomasse aérienne produite par du *Stylosanthes guianensis* qui aurait été produit comme précédant du riz pluvial (Fig. 2). Dans cet exemple, sans biomasse aérienne exportée, à savoir 9 t/ha de résidus restant au champ, la biomasse d'adventices représente 30% de celle sur un sol nu, l'érosion n'est que 10% de celle du sol nu, l'apport de carbone est de plus 5 t/ha en prenant en compte l'apport des racines. Si on prélève maintenant la moitié de la biomasse (4,5 t/ha), la quantité de biomasse d'adventices atteint plus de 70 % de celle sur sol nu, le contrôle de l'érosion est toujours effectif et les apports en C sont presque divisés par 2. Enfin, si toute la biomasse est prélevée par les animaux, la biomasse d'adventice et l'érosion atteindront leur maximum et l'apport en carbone sera minimum. Il restera toutefois une part de carbone apportée par les racines des plantes.

Cette figure montre les seuils, mais surtout la forme des relations entre biomasse restante et trois fonctions associées. Que ce soit sous la forme d'équation mathématique dans un modèle informatisé ou sous la forme plus simple d'abaques, ce type de représentation pourrait aider les acteurs dans leurs choix techniques. L'intérêt d'avoir un cadre conceptualisé et décliné sur plusieurs terrains serait notamment de faciliter le calage des modèles sous-jacents et donc de s'assurer de leur fiabilité. Couplés à des modèles ou à de la connaissance experte sur la production animale, ce type de représentation devrait permettre de mieux expliciter les compromis entre les fonctions attendues du mulch et les éventuels gains en production animale.

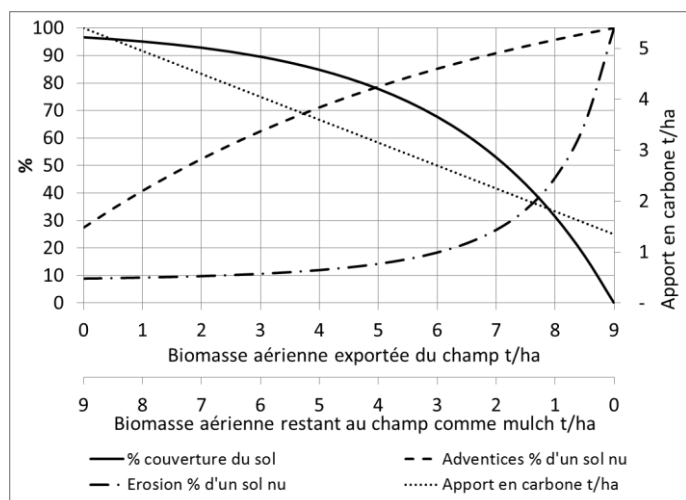


Figure 2: schéma récapitulatif de l'évolution de 3 fonctions (contrôle du ruissellement et des adventices et apport de carbone au sol) avec l'exportation de biomasse.

La simulation présentée ici est faite pour une parcelle de jachère améliorée de *Stylosanthes guianensis* qui aurait produit 9 t/ha de biomasse aérienne et dont on choisirait de faire pâturer une partie par les animaux. Les données proviennent d'études menées dans la région du lac Alaotra à Madagascar. L'évolution du % de couverture a été calibrée localement (Naudin et al., 2012). La relation entre quantité de mulch et biomasse d'adventices a été mesurée pendant deux ans (Ranaivoson et al., 2015). L'érosion présentée ici correspond à l'érosion entre-rigole prédite dans le modèle RUSLE en fonction de la couverture du sol (Renard et al., 1997). L'apport en carbone par la biomasse aérienne et souterraine est basée sur l'hypothèse d'une production de 9 t/ha de tiges + feuilles, d'un ratio entre biomasse racinaire et aérienne de 1/3 (mesuré localement (Botoela Mahalova, 2013)) et d'une teneur en C de la biomasse de 45%.

Conclusion

La quantité de résidus végétaux conservée sur le sol a un rôle central dans les performances des systèmes en AC, d'autant que l'expression des fonctions agroécologiques attendue de la couverture varie énormément en fonction de la quantité de biomasse restituée. Ces fonctions commencent à être assez bien renseignées par les travaux des différents spécialistes. En revanche, il n'existe pas pour l'instant de travaux incluant ces différents impacts dans un même cadre d'analyse prenant en compte les différentes temporalités de ces impacts. Or, les producteurs, ou les décideurs de l'agriculture au sens large, ont besoin d'une évaluation multicritères quantifiée de ces systèmes de culture, pour (i) connaître les effets de l'AC réellement atteignables dans les conditions de production paysanne ; (ii) évaluer l'adéquation de ces effets avec les contraintes majeures des systèmes de culture et de production de la zone concernée ; et (iii) mettre en balance les bénéfices atteignables par l'utilisation de l'AC avec, d'une part, les besoins en connaissances, intrants et temps de travaux à mobiliser, et d'autre part, les bénéfices potentiels de l'utilisation de la biomasse pour nourrir le bétail.

Dans cette perspective, les agronomes peuvent jouer un rôle d'intégration des connaissances sur les différents impacts de l'AC, à l'aide de modèles quantitatifs, mêmes simples. Mettre au point un cadre d'analyse transversal à différentes situations agricoles permettrait de gagner en généralité et donc de fournir plus rapidement des analyses *ex-ante* de l'impact des systèmes en AC. Ce cadre permettrait aux agronomes de plus facilement échanger avec leurs collègues travaillant aux échelles supérieures (exploitation, territoire) mais aussi, avec les structures d'appui aux agriculteurs. Le tout dans un objectif d'accompagnement des agriculteurs avec des systèmes de cultures sur le plan agrono-

mique et sur le plan économique mieux adaptés face aux changements du monde rural.

Références

- Altieri, M. a., M. a. Lana, H. V. Bittencourt, A.S.A.S. Kieling, J.J. Comin, and P.E. Lovato. 2011. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Sustainable Agriculture* 35(8): 855-869.
- Andriarimalala, J.H., J.N. Rakotozandry, A.L.H. Andriamandrosoa, É. Penot, K. Naudin, P. Dugué, E. Tillard, V. Decruyenaere, and P. Salgado. 2013. Creating Synergies Between Conservation Agriculture and Cattle Production in Crop-Livestock Farms: a Study Case in the Lake Alaotra Region of Madagascar. *Experimental Agriculture* 49(3): 352-365.
- Baudron, F., S. Delmotte, M. Corbeels, J.M. Herrera, and P. Tittonell. 2015a. Multi-scale trade-off analysis of cereal residue use for livestock feeding vs. soil mulching in the Mid-Zambezi Valley, Zimbabwe. *Agricultural Systems* 134: 97-106.
- Baudron, F., M. Jaleta, O. Okitoi, and A. Tegegn. 2013. Conservation agriculture in African mixed crop-livestock systems: Expanding the niche. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187: 171-182.
- Baudron, F., A. Mamo, D. Tirfessa, and M. Argaw. 2015b. Impact of farmland enclosure on the productivity and sustainability of a mixed crop-livestock system in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 207: 109-118.
- Baudron, F., P. Tittonell, M. Corbeels, P. Letourmy, and K.E. Giller. 2012. Comparative performance of conservation agriculture and current smallholder farming practices in semi-arid Zimbabwe. *Field Crops Research* 132: 117-128.
- Blanchart, E., M. Bernoux, X. Sarda, M. Siqueira Neto, C.C. Cerri, M. Piccolo, J.-M. Douzet, E. Scopel, and C. Feller. 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 72(1): 81-87.
- Blanchart, E., C. Villenave, A. Viallatoux, B. Barthès, C. Girardin, A. Azontonde, and C. Feller. 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. utilis) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology* 42: S136-S144.
- Blanco-Canqui, H., and R. Lal. 2009. Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28(3): 139-163.
- Bolinder, M.A., D.A. Angers, and J. Dubuc. 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 9: 61-66.
- Bolliger, A., J. Magid, T. Jorge, C. Amado, F.S. Neto, M. De Fatima, A. Calegari, R. Ralisch, A. De Neergaard, J.C.T. Amado, F. Skóra Neto, M. de F. dos S. Ribeiro, A. de Neergaard, and L.S. Donald. 2006. Taking Stock of the Brazilian "Zero Till Revolution": A Review of Landmark

- Research and Farmers' Practice. *Advances in Agronomy* 91(06): 47-110.
- Botoela Mahalova, O. 2013. Evaluation de la biomasse racinaire des principales cultures et plantes de couverture utilisées dans les systèmes SCV au lac Alaotra. Mémoire d'ingénieur. Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Brevault, T., S. Bikay, J.M. Maldès, and K. Naudin. 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research* 97(2): 140-149.
- Brevault, T., H. Guibert, and K. Naudin. 2008. Preliminary studies of pest constraints to cotton seedlings in a direct seeding mulch-based system in Cameroon. *Experimental agriculture* 45(01): 25-33.
- Brown, G.G., N.P. Benito, A. Pasini, K.D. Sautter, M.D.F. Guimarães, and E. Torres. 2003. No-tillage greatly increases earthworm populations in Paraná state, Brazil. *Pedobiologia* 47: 764-771.
- Bruelle, G., K. Naudin, E. Scopel, R. Domas, L. Rabeharisoa, and P. Tittonell. 2014. Short- to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: evidence from farmer's fields in Madagascar. *Experimental Agriculture*: 1-19.
- Bunna, S., P. Sinath, O. Makara, J. Mitchell, and S. Fukai. 2011. Effects of straw mulch on mungbean yield in rice fields with strongly compacted soils. *Field Crops Research* 124(3): 295-301.
- Buyanovsky, G.A., and G.H. Wagner. 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant and Soil* 93(1): 57-65.
- Campiglia, E., F. Caporali, E. Radicetti, and R. Mancinelli. 2010. Hairy vetch (*Vicia villosa* Roth .) cover crop residue management for improving weed control and yield in no-tillage tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill .) production. *European Journal of Agronomy* 33(2): 94-102.
- Corbeels, M., J. de Graaff, T.H. Ndah, E. Penot, F. Baudron, K. Naudin, N. Andrieu, G. Chirat, J. Schuler, I. Nyagumbo, L. Rusinamhodzi, K. Traore, H.D. Mzoba, and I.S. Adolwa. 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187: 155-170.
- Corbeels, M., E. Scopel, A. Cardoso, M. Bernoux, J.-M. Douzet, and M.S. Neto. 2006. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biology* 12(9): 1773-1787.
- Derpsch, R., a. J.J. Franzluebbers, S.W.W. Duiker, D.C. Reicosky, K. Koeller, T. Friedrich, W.G.G. Sturny, J.C.D.M. Sá, and K. Weiss. 2014. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil and Tillage Research* 137: 16-22.
- Djamen, P., N. Andrieu, I. Zerbo, Y. Ouédraogo, and P.-Y. Le Gal. 2015. Agriculture de conservation et performances des exploitations agricoles en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures* 24: 113-122.
- Dugué, P., and J.-P. Olin. 2015. Processus d'innovation et recomposition des territoires agricoles : le cas du semis sous couvert végétal au nord du Cameroun. 24: 93-101.
- FAO. 2016. FAO:AG:Agriculture de conservation. Available at www.fao.org/ag/ca/fr/1a.html.
- Findeling, A., S. Ruy, and E. Scopel. 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of Hydrology* 275(1-2): 49-66.
- Giller, K.E. 2001. Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CABI, Wallingford, Oxon, UK.
- Giller, K.E., E. Witter, M. Corbeels, and P. Tittonell. 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research* 114(1): 23-34.
- Homann-Kee Tui, S., D. Valbuena, P. Masikati, K. Descheemaeker, J. Nyamangara, L. Claessens, O. Erenstein, A. van Rooyen, and D. Nkomboni. 2014. Economic trade-offs of biomass use in crop-livestock systems: Exploring more sustainable options in semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Systems* 134: 48-60.
- Iqbal, M., A. Anwar-Ul-Hassan, and H.M. van Es. 2011. Influence of residue management and tillage systems on carbon sequestration and nitrogen, phosphorus, and potassium dynamics of soil and plant and wheat production in semi-arid region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42(5): 528-547.
- Jordán, A., L.M. Zavala, J. Gil, and A. Jordan. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81(1): 77-85.
- Kätterer, T., M.A. Bolinder, O. Andrén, H. Kirchmann, and L. Menichetti. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141(1-2): 184-192.
- Lal, R. 1997. Mulching Effects on Runoff , Soil Erosion , and Crop Response on Alfisols in Western Nigeria. *Journal of Sustainable Agriculture* 11(2-3): 135-154.
- Lal, R. 1998. Soil quality changes under continuous cropping for seventeen seasons of an alfisol in western Nigeria. *Land Degradation & Development* 9(3): 259-274.
- Lal, R. 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation* 70(3): 55A-62A.
- Liu, C., M. Lu, J. Cui, B. Li, and C. Fang. 2014. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global change biology* 20(5): 1366-81.
- Maltas, A., M. Corbeels, E. Scopel, J. Wery, and F.A.M. Da Silva. 2009. Cover Crop and Nitrogen Effects on Maize Productivity in No-Tillage Systems of the Brazilian Cerrados. *Agronomy Journal* 101(5): 1036-1046.
- Mischler, R., S.W. Duiker, W.S. Curran, and D. Wilson. 2010. Hairy Vetch Management for No-Till Organic Corn Production. *Agronomy Journal* 102(1): 355.
- Naudin, K., G. Bruelle, P. Salgado, É. Penot, E. Scopel, M. Lubbers, N. de Ridder, K.E. Giller, E. Penot, E. Scopel, M. Lubbers, N. de Ridder, and K.E. Giller. 2014. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar.

Naudin, K., E. Goze, O. Balarabe, K.E. Giller, and E. Scopel. 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. *Soil and Tillage Research* 108(1-2): 68-76.

Naudin, K., E. Scopel, A.L.H. Andriamandrosoa, M. Rakotosolofo, N.R.S. Andriamaroso ratsimbazafy, J.N. Rakotozandriny, P. Salgado, and K.E. Giller. 2012. Trade-offs between biomass use and soil cover. the case of rice-based cropping systems in the lake Alaotra region of Madagascar. *Experimental Agriculture* 48(02): 194-209.

Ngwira, A.R., J.B. Aune, S. Mkwinda, R. Serraj, and K.H.M. Siddique. 2012. On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi. *Field Crops Research* 132: 149-157.

Ramesh, K. 2015. Weed Problems, Ecology, and Management Options in Conservation Agriculture: Issues and Perspectives. *Advances in Agronomy* 131: 251-303.

Ranaivoson, L., S. Rakotonjanahary, K. Naudin, A. Ripoché, J. Rakotoarisoa, L. Rabearisoa, and M. Corbeels. 2015. Effect of conservation agriculture on weed infestation in rainfed rice. In 17th European Weed Research Society Symposium "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France.

Ratnadass, A., R. Randriamanantsoa, T.E. Rajaonera, M.Y. Rabearisoa, É. Rafamatanantsoa, N. Moussa, and R. Michelon. 2013. Interaction entre le système de culture et le statut (ravageur ou auxiliaire) des vers blancs (Coleoptera : Scarabaeoidea) sur le riz pluvial Alain. *Cahiers Agricultures* 22(5): 432-441.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). US Government Printing Office.

Rockström, J., P. Kaumbutho, J. Mwalley, A.W. Nzabi, M. Temesgen, L. Mawenya, J. Barron, J. Mutua, and S. Damgaard-Larsen. 2009. Conservation farming strategies in East and Southern Africa: Yields and rain water productivity from on-farm action research. *Soil and Tillage Research* 103(1): 23-32.

Sainju, U.M., W.F. Whitehead, B.P. Singh, and S. Wang. 2006. Tillage, cover crops, and nitrogen fertilization effects on soil nitrogen and cotton and sorghum yields. *European Journal of Agronomy* 25(4): 372-382.

Scopel, E., E. Chavez Guerra, and J.M. Arreola-Tostado. 1999. Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest mexicain : une histoire d'eau ? *Agriculture et Développement* 21: 76-86.

Scopel, E., A. Findeling, and M. Corbeels. 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy for sustainable development* 25(4): 425-432.

Scopel, E., F.A.M. Da Silva, M. Corbeels, F. Affholder, and F. Maraux. 2004. Modelling crop residue mulching effects on

water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24(6-7): 383-395.

Sissoko, F., F. Affholder, P. Autfray, J. Wery, and B. Rapidel. 2013. Wet years and farmers' practices may offset the benefits of residue retention on runoff and yield in cotton fields in the Sudan-Sahelian zone. *Agricultural Water Management* 119: 89-99.

Smets, T., J. Poesen, and A. Knapen. 2008. Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water. *Earth-Science Reviews* 89(1-2): 1-12.

Smith, G.D., K.J. Coughlan, D.F. Yule, K.B. Laryea, K.L. Srivastava, N.P. Thomas, and A.L. Cogle. 1992. Soil management options to reduce runoff and erosion on a hardsetting Alfisol in the semi-arid tropics. *Soil and Tillage Research* 25(2-3): 195-215.

Thierfelder, C., T. Mombeyara, N. Mango, and L. Rusinamhodzi. 2013. Integration of conservation agriculture in smallholder farming systems of southern Africa: identification of key entry points. *International Journal of Agricultural Sustainability* 11(4): 317-330.

Tivet, F., J.C. de Moraes Sá, R. Lal, C. Briedis, P.R. Borzowskei, J.B. dos Santos, A. Farias, G. Eurich, D.D.C. Hartman, M. Nadolny Junior, S. Bouzinac, and L. Séguy. 2013. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. *Soil and Tillage Research* 126: 203-218.

Uri, N.D. 1998. The environmental consequences of the conservation tillage adoption decision in agriculture in the United States. *Water, Air, and Soil Pollution* 103(1-4): 9-33.

Woyessa, Y.E., and A.T.P.P. Bennie. 2004. Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil. *South African Journal of Plant and Soil* 21(4): 203-208.